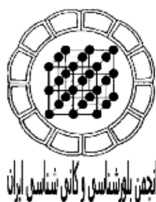
مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران

مقاله پژوهشی

سال سی و یکم، شمارهٔ اول، بهار ۱۴۰۲، از صفحهٔ ۷۵ تا ۹۰



[DOR: 20.1001.1.17263689.1402.31.1.6.7]

[DOI: 10.52547/ijcm.31.1.75]

بررسی پهنه‌های اسکارنی، شیمی کانی‌ها و شرایط تشکیل اگزواسکارن کانسارآهن بیشه (جنوب بیرجند)

ملیحه نخعی*[1]، سید احمد مظاهری[2]، محمدحسن کریم پور[2]، سید سعید محمدی[3]

۱- گروه مهندسی معدن، دانشکده معدن، عمران و شیمی، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

۲- گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۳- گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۴/۱۸، نسخه نهایی: ۱۴۰۱/۶/۵)

چکیده: در منطقه بیشه، هورنبلند دیوریت‌های پورفیری در سنگ‌های آهکی و توفی نفوذ نموده و اسکارن تشکیل داده‌اند. گارنت و پیروکسن به ترتیب فراوانترین کانی‌های اگزو اسکارن پیشرونده هستند. در مرحله پسرونده، اپیدوت، ترمولیت-اکتینولیت، کوارتز، کلسیت و کانی‌های کدر از جمله مگنتیت تشکیل شده‌اند. نتایج تجزیه ریزپردازش الکترونی نشان داد که گارنت‌های مورد بررسی به صورت محلول جامد آندرادیت و گروسولاریت هستند. گارنت‌های مورد بررسی تغییرات ناگهانی و نوسانی در نسبت Fe^{3+}/Al دارند که این پدیده نتیجه تغییر شرایط محلول‌های گرمابی طی رشد است. پیروکسن‌های مورد بررسی، به عضو انتهایی دیوپسید نزدیک هستند به‌طوری‌که کمترین مقدار دیوپسید در آنها ۶۴٫۹۷ درصد است. بر اساس ترکیب گارنت‌ها و پیروکسن‌ها، متوسط مقدار لگاریتم گریزندگی اکسیژن ۲۰٫۱۸- مگا پاسکال محاسبه گردید. حضور مگنتیت، پیریت و پیروتیت به همراه کلسیت و کوارتز در مجموعه کانیایی پسرونده نشانگر دمای کمتر از ۴۳۰ درجه سانتیگراد و گریزندگی گوگرد حدود 10^{-7} محلول‌های دگرنهاده کننده است.

واژه‌های کلیدی: *اسکارن؛ تجزیه ریزپردازش الکترونی؛ بیشه؛ لوت.*

مقدمه

اسکارن و ذخایر اسکارنی از دیدگاه علمی و در قالب دسته‌ای از کانسارها بیش از ۱۰۰ سال است که شناخته شده و مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱]. گوناگونی کانیایی، پیدایش کانی‌های کمیاب دگرنهاده، پتانسیل کانسارهای فلزی (Sn, W, Cu, Fe, Au, Zn, Pb) و سنگ‌ها و کانی‌های صنعتی (گارنت، ولاستونیت و اسپینل) در این سنگ‌ها باعث شده است که تاکنون پژوهش‌های متعددی درباره مسائل گوناگون اسکارن انجام شود. منطقه مورد بررسی در ۱۹۶ کیلومتری جنوب بیرجند و ۱۶ کیلومتری جنوب شرق قلعه‌زری، در نقشه زمین‌شناسی ۱۰۰۰۰۰ :۱ بصیران [۲] قرار دارد. هجوم توده‌های نفوذی-نیمه نفوذی ترشیری در سنگ آهک‌های پالئوسن باعث تشکیل اسکارن و کانی‌سازی آهن در منطقه مورد بررسی گردیده است. گستره جغرافیایی منطقه از عرض جغرافیایی ″۳۱°۴۲'۲۹ تا ″۳۱° ۴۴' ۱۳ شمالی و طول‌های جغرافیایی ″۵۹ °۰۵' ۳۵ تا ″۵۹ °۰۹'۱۲ شرقی است. در تقسیم‌بندی زمین‌شناسی و ساختاری ایران [۳]، این منطقه در قطعه لوت جای دارد. بیشتر ذخایر اسکارنی ارتباط نزدیکی با توده‌های نفوذی دارند و کانی‌های اسکارنی می‌توانند اطلاعات مربوط به محلول‌های تشکیل دهنده را ثبت نمایند [۴].

گارنت از کانی‌های معمول در انواع سنگ‌های آذرین و دگرگونی است و کاربرد گسترده‌ای در برآورد دما-فشار سنگ‌ها دارد. آهن و منیزیم این کانی نسبت به دما و کلسیم نسبت به فشار بسیار حساس هستند [۵] و از این رو، تجزیه این کانی

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۵۶۳۲۳۹۱۲۲۶، نمابر: ۰۵۶۳۲۲۵۲۰۲۵، پست الکترونیکی: nakhaei@birjandut.ac.ir

می‌تواند اطلاعات با ارزشی را به دست دهد. در این پژوهش، پهنه‌های مختلف اسکارنی (اگزواسکارن) بر اساس مطالعه‌های زیرزمینی، کانی‌شناسی ، تغییرات شیمیایی کانی‌های مهم چون گارنت و پیروکسن و شرایط فیزیکوشیمیایی تشکیل آن بررسی شده‌اند.

روش انجام کار

این پژوهش بر اساس بررسی‌های صحرایی، مقاطع نازک و مقاطع صیقلی انجام شده است. برای بررسی‌های سنگ‌نگاری و تفکیک پهنه‌بندی‌های اسکارن، حدود ۷۰۰ نمونه برداشت گردید. نمونه‌برداری از سطح و عمق با بررسی ۱۹ گمانه (۲۸۸۰ متر حفاری) انجام شد. سنگ‌نگاری با هدف سنگ‌شناسی و بررسی دگرسانی‌ها و پهنه‌های اسکارنی بوده است که در این راستا، تعداد ۳۸۰ مقطع نازک و نازک صیقلی بررسی گردید. به منظور بررسی تغییرات ترکیب شیمیایی کانی‌ها از پهنه‌های مختلف اسکارن و از منطقه نزدیک توده نفوذی به سمت آهک از چاه‌های شماره ۲، ۵ و ۳ تعداد ۸ مقطع نازک صیقلی تهیه و پس از انتخاب کانی‌های مورد نظر با ریزپردازنده الکترونی مدل Cameca SX50 در دانشگاه اوکلاهمای آمریکا با ولتاژ 20 kv و شدت جریان 20 nA تجزیه شدند. زمان شمارش برای هر تجزیه ۳۰ ثانیه و قطر الکترون‌های متمرکز ۲ میکرون بود.

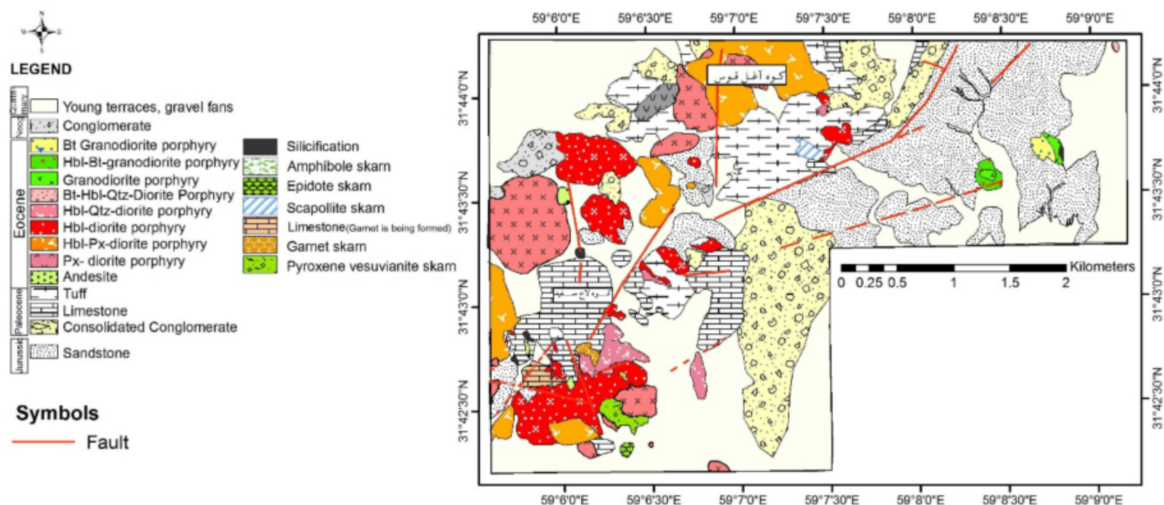
بحث و بررسی

زمین‌شناسی

واحدهای سنگی منطقه را می‌توان به پنج گروه سنگ‌های رسوبی، سنگ‌های آذرین عمیق و نیمه‌عمیق ، گدازه‌ها، آذرآواری‌ها و اسکارن‌ها تقسیم نمود (شکل ۱). شیل و ماسه‌سنگ‌های ژوراسیک قدیمی‌ترین واحد چینه‌سنگی منطقه مورد بررسی هستند. کنگلومرای پالئوسن از دیگر واحدهای رسوبی است که بر شیل و ماسه‌سنگ‌های ژوراسیک و زیر واحدهای ماگمایی ترشیری (آتشفشانی و نفوذی- نیمه‌عمیق) قرار دارد. آهک‌های پالئوسن در بخش جنوبی منطقه مورد بررسی رخنمون دارند. سنگ‌های تشکیل‌دهنده این واحد آهک بلورین و آهک فسیل‌دار هستند که با رنگ کرم روشن و صخره‌ای رخنمون دارند و ارتفاع‌های بلند را تشکیل می‌دهد. واحدهای ماگمایی ترشیری شامل سنگ‌های آتشفشانی (با گسترش کم)، آذرآواری و سنگ‌های عمیق و نیمه‌عمیق هستند. سنگ‌های آتشفشانی شامل آندزیت، داسیت و سنگ‌های آذرآواری بیشتر توفی شامل ویتریک توف شیشه‌ای، توف بلوری، توف بلوری شیشه‌ای، توف بلوری سنگی، توفیت و برش‌های آتشفشانی هستند. سنگ‌های نیمه‌عمیق با گسترش به نسبت زیاد در بخش‌های جنوبی، غربی و شمالی منطقه مورد بررسی رخنمون دارند. این سنگ‌ها در صحرا و نمونه دستی رنگ خاکستری روشن تا تیره دارند. سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری با این توده‌های نفوذی-نیمه‌عمیق قطع شده‌اند. توده‌های نفوذی - نیمه‌عمیق دیوریتی در آهک‌های رخنمون یافته در منطقه نفوذ کرده و باعث ایجاد اسکارن و کانی‌سازی آهن شده‌اند. (شکل ۲). در منطقه بیشه، شواهد حضور گسل‌های متعدد به‌صورت بریدگی، جابجایی و خردشدگی واحدهای مختلف دیده می‌شود. بررسی عکس‌های هوایی نشان می‌دهد که منطقه بیشه درون یک پهنه برشی چپ‌گرد با موقعیت N30E قرار دارد. به نظر می‌رسد که فضاهای بازشده ناشی از برهمکنش شکستگی‌های درون پهنه برشی امکان حرکت محلول‌های ماگمایی و درنتیجه کانی‌سازی را فراهم کرده‌اند. روند اصلی شکستگی‌ها حدود شرقی غربی است، اما شکستگی‌هایی با روند شمالی-جنوبی و شمال غربی-جنوب شرقی نیز در منطقه وجود دارند.

رخنمون اسکارن در منطقه مورد بررسی کم و شامل عدسی‌های کوچک و از نوع اگزواسکارن است. بررسی بیش از ۲۸۰۰ متر مغزه حفاری نشان داد که هجوم هورنبلند دیوریت‌های پورفیری در سنگ آهک‌ها، سنگ‌های آذرآواری و سنگ‌های دیوریتی پیروکسن‌دار، باعث تشکیل اگزواسکارن و اندواسکارن در منطقه شده است. از نظر سنگ‌شناسی، اسکارن منطقه بیشه به سه دسته اگزواسکارن (Exoskarn)، اندواسکارن (Endoskarn) و اسکارن کانه‌دار (Ore skarns) قابل تقسیم است (شکل ۳).

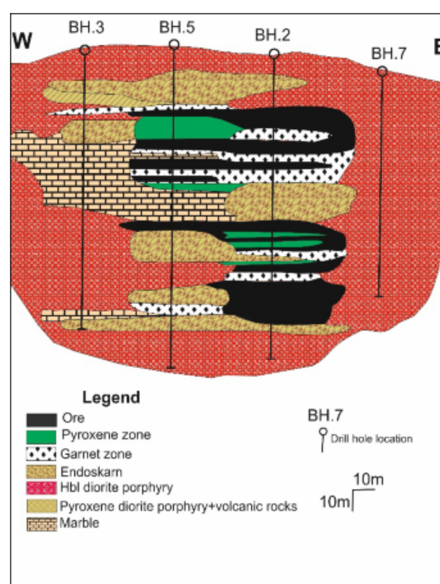
[DOR: 20.1001.1.17263689.1402.31.1.6.7]
[DOI: 10.52547/ijcm.31.1.75]



شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی منطقه بیشه.



شکل ۲ نمایی از پهنه اسکارنی و ارتباط آن با توده‌های نیمه‌عمیق و آهک‌ها در منطقه موردبررسی (دید به شمال).



شکل ۳ مقطع زمین‌شناسی ساده شده از تشکیل اسکارن و پهنه‌های اسکارنی در منطقه بیشه.

پهنه‌های اسکارنی منطقه بیشه

چنان که بیان گردید، رخنمون اسکارن در منطقه مورد بررسی کم و به صورت عدسی های کوچک پراکنده است. به منظور بررسی پهنه‌های مختلف اسکارنی از مغزه‌های حفاری استفاده شد. در نامگذاری پهنه‌های اسکارنی، در صورتیکه مقدار کانی اسکارنی بیش از ۵۰ درصد باشد نام کانی به عنوان پیشوند و در غیر این صورت بعنوان پسوند به دنبال نام اسکارن آمده است. جدول ۱ نشانه‌های اختصاری کانی‌های به کار رفته در تصاویر میکروسکوپی را نشان می‌دهد [۶].

پهنه گارنت

این پهنه شامل گارنت اسکارن، گارنت اسکارن پیروکسن‌دار، گارنت اسکارن وزوویانیت‌دار است که در ادامه توصیف می‌شوند.

گارنت اسکارن: بر اساس بررسی‌های میکروسکوپی، گارنت مهم‌ترین کانی اسکارنی در منطقه بیشه است. بافت اصلی گارنت اسکارن‌ها گرانوبلاستیک بوده و مقدار گارنت در برخی نمونه‌های مورد بررسی از ۵۰ تا ۸۰ درصد حجم سنگ، متغیر است (شکل ۴ الف). گارنت هم به صورت همسانگرد و هم ناهمسانگرد وجود دارد. اندازه دانه‌های گارنت از حد بسیار ریز ۲۰ میکرون تا حدود ۱ میلیمتر تغییر می‌کند. رگچه‌های فراوان کلسیت این سنگ‌ها را قطع نموده‌اند (شکل ۴ ب).

گارنت اسکارن پیروکسن‌دار: بافت سنگ گرانوبلاستیک تا پورفیروبلاستیک بلوری است؛ ۶۵ تا ۷۵ درصد حجم سنگ‌ها را گارنت و ۸ تا ۱۰ درصد حجم آن‌ها را کلینوپیروکسن تشکیل می‌دهد (شکل ۴ پ). در بعضی نمونه‌ها، مقدار پیروکسن به ۳۰ درصد نیز می‌رسد. گارنت‌ها از نوع همسانگرد و ناهمسانگرد بوده و برخی گارنت‌های همسانگرد دارای سایه‌های آبی رنگ وزویانیت هستند. تبدیل‌شدگی گارنت‌ها به کلسیت و کوارتز دیده می‌شود. اندازه گارنت‌ها و از ۳۰۰ میکرون تا حدود ۲ میلی‌متر متغیر است. کلینوپیروکسن با زاویه خاموشی ۳۵ تا ۴۰ درجه و رنگ دوشکستی نارنجی از نوع دیوپسید است. در بعضی نمونه‌ها، حدود ۵۰ درصد حجم سنگ را بیوتیت اکسید شده تشکیل داده (شکل ۴ ت) که نشان‌دهنده اکسایش چند مرحله‌ای است. در این سنگ‌ها، پیروکسن به آمفیبول و آمفیبول به بیوتیت دگرسان شده است.

گارنت اسکارن وزوویانیت‌دار: مقدار گارنت حدود ۵۰ درصد حجمی سنگ است که به همراه وزوویانیت (۱۵ درصد حجمی) و کلینوپیروکسن (۲ تا ۵ درصد حجمی) در زمینه‌ای از کلسیت و کلریت قرار دارند. گارنت‌ها به دو صورت همسانگرد و ناهمسانگرد بوده و گارنت‌های ناهمسانگرد دارای منطقه‌بندی هستند. گارنت‌ها به کربنات تبدیل شده‌اند و بافت حلقوی از پدیده‌های معمول است. در این نمونه‌ها، وزوویانیت به صورت شعاعی است و در نیکول‌های عمود بر هم به رنگ خاکستری دیده می‌شود (شکل ۵ الف) که از این رو، با رنگ تداخلی متداول در وزوویانیت‌ها (قهوه‌ای –حنایی) مغایرت دارد. البته نتایج تجزیه به روش ریزپردازشی الکترونی [۷] تأیید کننده کانی وزوویانیت است.

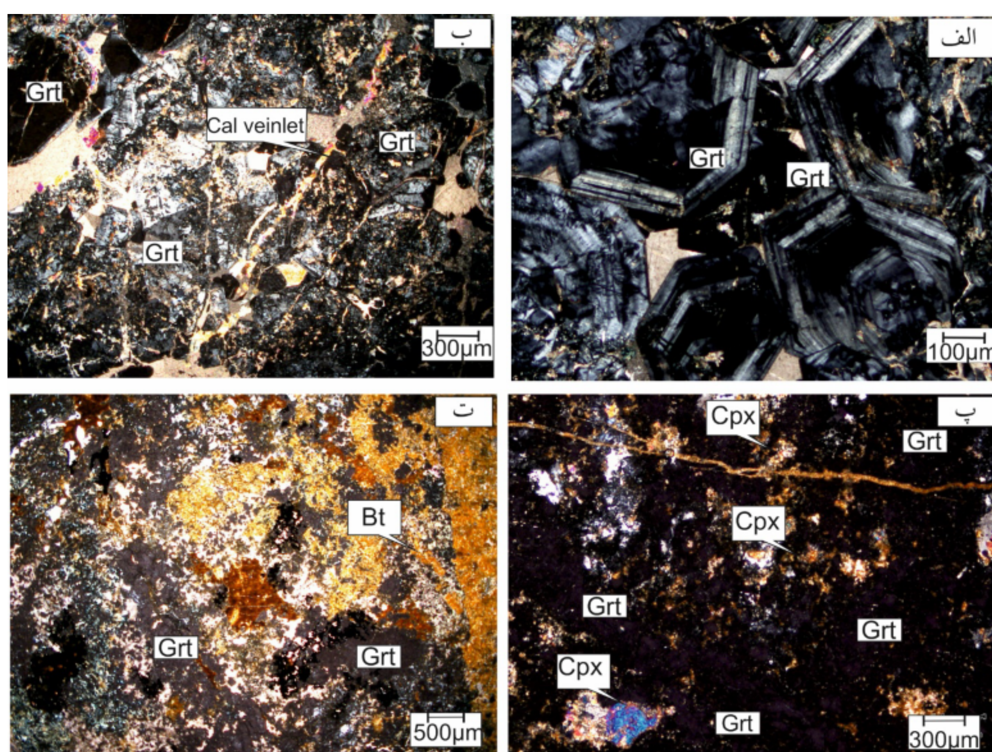
پهنه پیروکسن

این پهنه شامل پیروکسن اسکارن و پیروکسن اسکارن گارنت‌دار است که در ادامه ویژگی‌های آن‌ها بیان می‌شود.

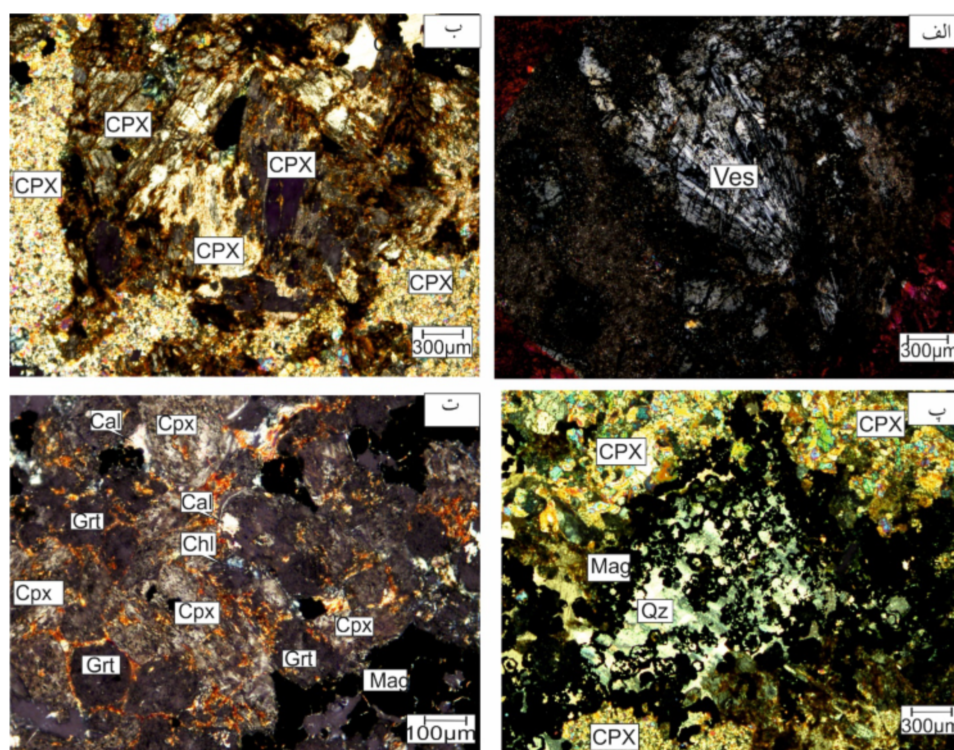
پیروکسن اسکارن: بافت غالب در این سنگ دانه‌شکفتی است. پیروکسن مهم‌ترین کانی تشکیل‌دهنده این پهنه است که ۸۰ تا ۸۵ درصد حجم سنگ را شامل می‌شود (شکل ۵ ب). کلسیت (به مقدار ۵ تا ۱۰ درصد حجمی سنگ)، وزوویانیت و اسفن دیگر کانی‌های همراه هستند. مگنتیت و کالکوپیریت از کانه‌های موجود هستند که فراوانی آنها به ترتیب ۵ و ۲ تا ۳ درصد حجمی سنگ است. مقدار مگنتیت در برخی نمونه‌ها به ۱۰ درصد حجمی می‌رسد (شکل ۵ پ). پیریت از دیگر کانی‌های فلزی است که گاهی به مقدار ۱۵ درصد حجمی دیده می‌شود.

جدول ۱ نشانه‌های اختصاری کانی‌های بکار رفته در تصاویر برگرفته از مرجع [۶].

نام کانی	علامت اختصاری
گارنت	Grt
کلینوپیروکسن	CPx
بیوتیت	Bt
وزوویانیت	Ves
کوارتز	Qz
کلسیت	Cal
مگنتیت	Mag



شکل ۴ تصاویر میکروسکوپی از الف و ب) گارنت اسکارن‌ها و پ و ت) گارنت اسکارن‌های کلینوپیروکسن‌دار منطقه مورد بررسی در نور قطبیده متقاطع (XPL)، علائم اختصاری کانی‌ها برگرفته از مرجع [۶] است.



شکل ۵ تصاویر میکروسکوپی از الف) کانی وزوویانیت به شکل شعاعی در گارنت اسکارنهای وزوویانیت‌دار، ب) پیروکسن اسکارن، پ) تشکیل مگنتیت در کلینوپیروکسن اسکارن‌ها و ت) تشکیل کلسیت و کلریت در پیروکسن اسکارن‌های گارنت‌دار منطقه مورد بررسی، همه تصاویر در XPL.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1402.31.1.6.7]
[DOI: 10.52547/ijcm.31.1.75]

پیروکسن اسکارن گارنت‌دار: مجموعه کانیایی کلینوپیروکسن+ گارنت± مگنتیت±کلسیت±کلریت مشخص کننده این پهنه است. زمینه سنگ به مقدار ۵۰ تا ۵۵ درصد حجمی از کلینوپیروکسن تشکیل شده است. کلینوپیروکسن به صورت درشت بلورهای بزرگ نیز حدود ۱۵ درصد سنگ را تشکیل داده است. مقدار گارنت از حدود ۱۰ تا ۲۰ درصد حجمی متغیر است. پیروکسن‌ها به صورت بلورهای منشوری وجود دارند و در برخی نمونه‌ها مقدار آن‌ها به ۷۰ تا ۸۰ درصد حجمی می‌رسد. کلسیت و کلریت به ترتیب با فراونی ۱۵ و ۱۰ درصد حجمی از کانی‌های ایجاد شده طی تشکیل اسکارن پسرونده هستند (شکل ۵ ت).

گارنت‌ها بیشتر همسانگرد هستند، اما گارنت ناهمسانگرد نیز دیده می‌شود. وزوویانیت و کلسیت از دیگر کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگ هستند. مگنتیت گاهی به مقدار ۳ تا ۴ درصد حجمی، در محل شکستگی‌ها و از تبدیل کانی گارنت ایجاد شده است. کالکوپیریت از دیگر کانه‌های موجود در این پهنه بوده که به مقدار کمتر از ۱ درصد حجمی قابل دیده است. کانی اپیدوت نیز به صورت بلورهای درشت و از تبدیل گارنت به وجود آمده است. حضور اسفن و اپیدوت بیانگر بالا بودن گریزندگی اکسیژن و اکسید کلسیم در محیط و سیال-های گرمابی است [۸].

شکل ۳ مقطع زمین‌شناسی ساده شده از تشکیل اسکارن و پهنه‌های اسکارنی در منطقه بیشه را نشان می‌دهد. چنان که دیده می‌شود، پهنه گارنت در کنار توده نفوذی تشکیل شده است. کانی‌سازی مگنتیت نیز به صورت بین انگشتی همراه با پهنه گارنت وجود دارد. مگنتیت از تبدیل گارنت به وجود آمده است. با فاصله گرفتن از توده نفوذی و نزدیک شدن به سنگ آهک، مقدار گارنت کم و مقدار پیروکسن اضافه می‌گردد که این امر در سایر اسکارن‌ها نیز متداول است.

شیمی کانی‌ها

چنان که بیان شد، گارنت و پیروکسن مهمترین کانی‌های اگزواسکارن پیشرونده در منطقه بیشه هستند. به‌منظور بررسی ترکیب شیمیایی این کانی‌ها، نمونه‌های برداشت شده از پهنه‌های مختلف اسکارن و از منطقه نزدیک توده نفوذی به سمت آهک از چاه‌های شماره ۲، ۵ و ۳ تجزیه شدند.

گارنت

گارنت به دلیل پایداری ساختاری و ویژگی‌های شیمیایی، می‌تواند فرآیندهای زمین‌شناسی را ثبت نماید [۹]، از این رو، تعداد ۱۵۰ نقطه در گارنت‌ها به روش ریزپردازش الکترونی تجزیه شدند. گارنت‌های مورد بررسی به صورت محلول‌های جامد آندرادیت ($Ca_3Fe_2Si_3O_{12}$, And) و گروسولاریت ($Ca_3Al_2Si_3O_{12}$, Gro) و بیشتر شامل مقدار کمتری اسپسارتین ($Ca_3Mn_2Si_3O_{12}$, Spe)، آلماندین ($Fe_3Al_2Si_3O_{12}$, Alm) و پیروپ ($Mg_3Al_2Si_3O_{12}$, Pyr) هستند. نتایج تجزیه ریزپردازشی تعدادی از گارنت‌ها و محاسبه اعضای پایانی آن‌ها با نرم‌افزار Mineral Formula در جدول ۲ آمده است.

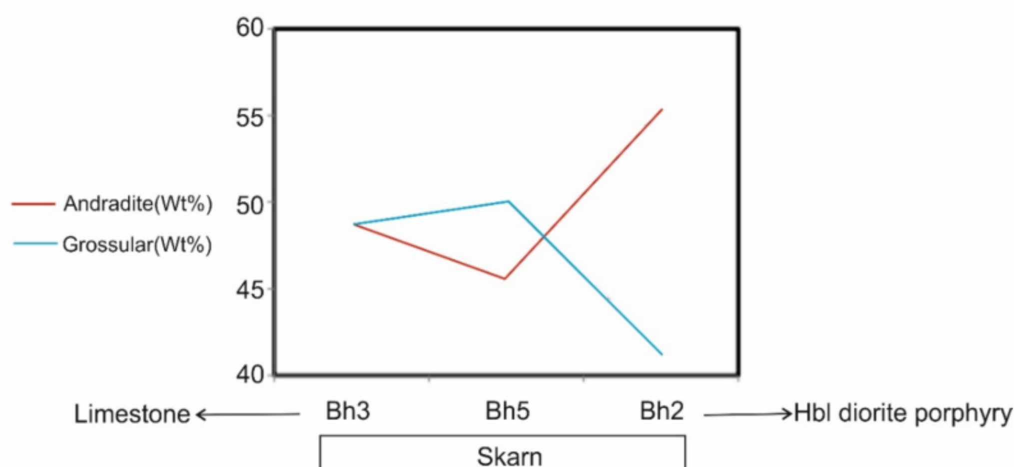
میانگین ترکیب گارنت‌های برداشت شده از اگزواسکارن‌های مورد بررسی از نزدیک توده نیمه‌عمیق به سمت سنگ آهک به ترتیب شامل ۵۵، ۴۶ و ۴۹ درصد وزنی آندرادیت است. بیشترین درصد آندرادیت در چاه شماره ۲ و در کنار توده نفوذی و منطبق بر بیشترین کانی‌سازی آهن وجود دارد. با فاصله گرفتن از توده نیمه‌عمیق، مقدار آندرادیت به ۴۵/۶۶ درصد کاهش می‌یابد و با روندی تقریباً ثابت (۴۸/۸۰ درصد) در چاه شماره ۳ نیز وجود دارد (شکل ۶).

تصویر میکروسکوپی و الکترونی‌های پس پراکنده (BSE) دو بلور گارنت با منطقه‌بندی مشخص در شکل ۷ نشان داده شده است. در شکل ۷ ب، مکان تجزیه نقطه‌ای با دایره‌های سفید رنگ مشخص شده است. شکل‌های ۸ الف و ب تغییرات درصد وزنی اکسیدهای FeO، Al_2O_3، SiO_2 و CaO را از مرکز به طرف لبه بلور نشان می‌دهد. چنان که دیده می‌شود، درصد وزنی FeO و Al_2O_3 دارای نوسان است. در نقاطی که درصد وزنی FeO (شاخص آندرادیت) کاهش یافته است، درصد وزنی Al_2O_3 (شاخص گروسولار) افزایش نشان می‌دهد و برعکس. درصد وزنی SiO_2 و CaO از مرکز به لبه تغییرات ناچیزی را نشان داده و تقریباً ثابت است. شکل‌های ۸ پ و ت نیز تغییرات درصد وزنی آندرادیت را در مرکز و لبه گارنت‌های مورد بررسی نشان می‌دهد. چنان که دیده می‌شود، درصد آندرادیت نیز در بخش‌های مختلف بلور دارای نوسان است. این نوسان در گستره 209-C8a بیشتر مشهود است به طوری که مقدار آندرادیت در منطقه مرکزی بلور، بیشینه و به طرف لبه در حال کاهش است. در لبه بلور، مقدار آندرادیت افزایش ناگهانی دارد.

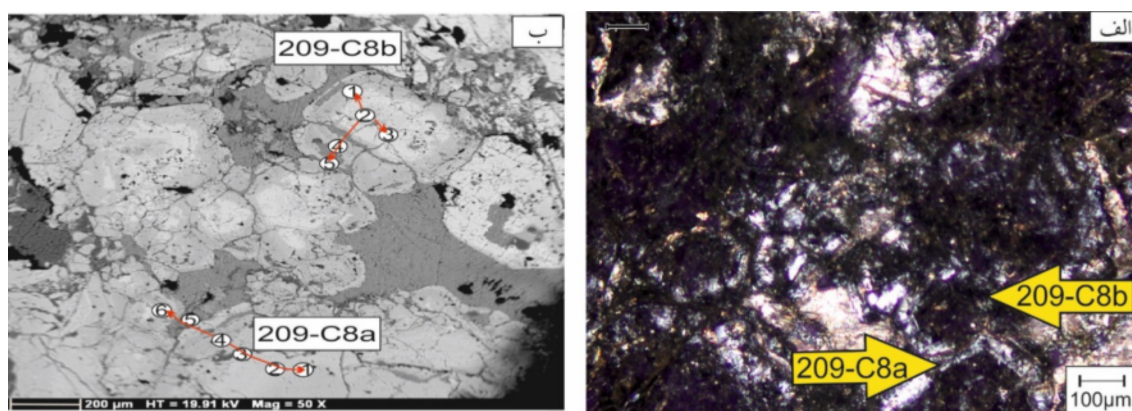
[DOR: 20.1001.1.17263689.1402.31.1.6.7]
[DOI: 10.52547/ijcm.31.1.75]

جدول ۲ نتایج تجزیه ریزپردازشی گارنت‌ها و محاسبه اعضای پایانی آن‌ها بر پایه ۱۲ اکسیژن.

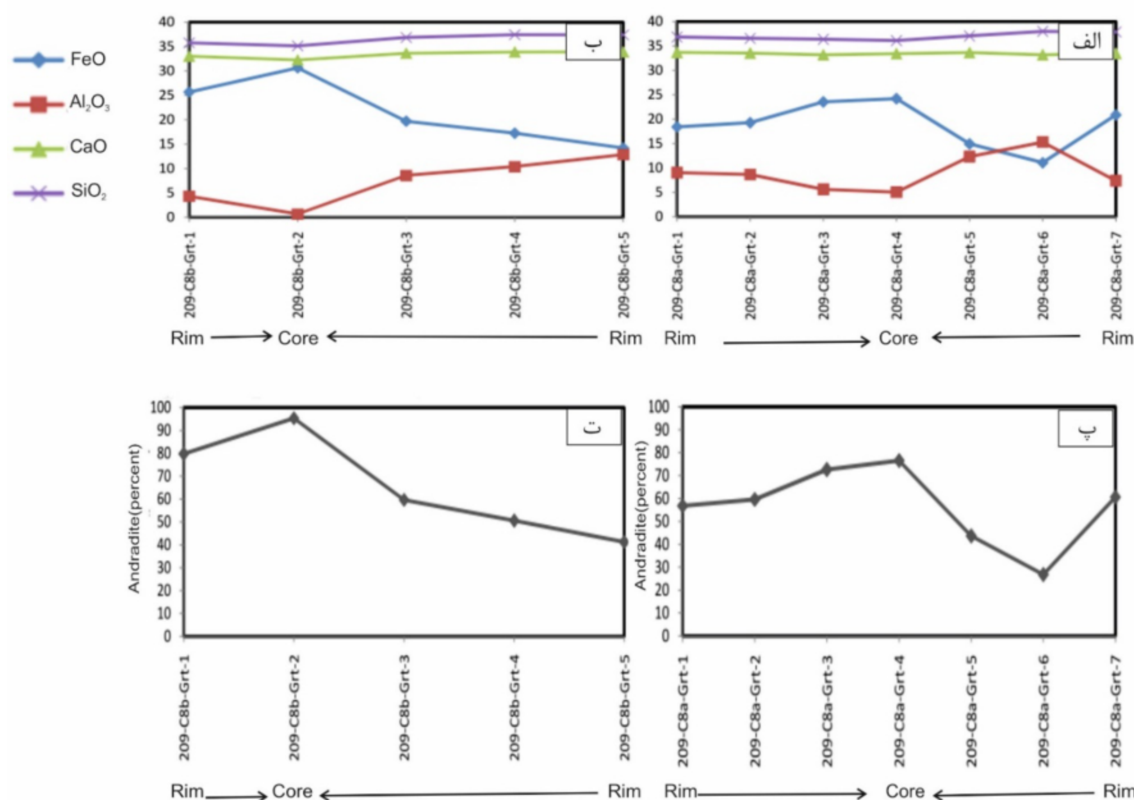
	243-C5-Grt1-1	243-C5-Grt1-2	243-C5-Grt1-3	243-C5-Grt1-4	243-C5-Grt2-1	243-C5-Grt2-2	243-C5-Grt2-3	243-C7-Grt1-1	243-C7-Grt1-2	243-C7-Grt1-3
SiO_2	۳۷٫۷۴	۳۷٫۸۰	۳۷٫۷۴	۳۷٫۵۷	۳۷٫۲۸	65٫37	۳۷٫۳۱	۳۵٫۷۲	۳۶٫۲۶	۳۶٫۳۸
TiO_2	۰٫۲۰	۰٫۱۷	۰٫۲۲	۰٫۱۹	۰٫۴۷	۰٫۴۶	۰٫۵۴	۰٫۰۹	۱٫۲۱	۱٫۲۲
Al_2O_3	۱۰٫۵۹	۱۰٫۰۷	۹٫۵۴	۱۰٫۲۸	۹٫۳۲	۹٫۴۶	۹٫۴۵	۱۶٫۳۷	۷٫۶۵	۹٫۲۹
Cr_2O_3	۰۰٫۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۲	۰٫۰۰
FeO	۱۶٫۷۹	۱۷٫۵۸	۱۸٫۲۸	۱۷٫۴۵	۱۸٫۱۹	۱۷٫۹۱	۱۸٫۱۵	۵٫۸۲	۱۹٫۶۲	۱۸٫۰۴
MnO	۰٫۲۲	۰٫۱۹	۰٫۱۹	۰٫۱۹	۰٫۱۵	۰٫۲۱	۰٫۱۸	۰٫۱۶	۰٫۱۷	۰٫۲۱
MgO	۰٫۱۴	۰٫۱۲	۰٫۱۸	۰٫۱۲	۰٫۱۹	۰٫۲۱	۰٫۱۹	۱٫۷۱	۰٫۱۳	۰٫۱۰
CaO	۳۴٫۴۰	۳۴٫۲۹	۳۴٫۲۱	۳۴٫۳۳	۳۴٫۳۰	۳۴٫۲۲	۳۳٫۹۹	۳۴٫۶۴	۳۳٫۷۳	۳۳٫۹۳
Total	۱۰۰٫۰۹	۱۰۰٫۲۲	۱۰۰٫۵۳	۱۰۰٫۴	۹۹٫۹۰	۱۰۰٫۱۲	۹۹٫۸۳	۹۴٫۵۰	۹۸٫۷۸	۹۹٫۱۷
Formula (corr.)	۱۲(O)	۱۲(O)	۱۲(O)	۱۲(O)	۱۲(O)	۱۲(O)	۱۲(O)	۱۲(O)	۱۲(O)	۱۲(O)
Si	۲٫۹۷	۲٫۹۸	۲٫۹۷	۲٫۹۶	۲٫۹۵	۲٫۹۷	۲٫۹۶	۲٫۸۷	۲٫۹۳	۲٫۹۱
Ti	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۱	۰٫۰۷	۰٫۰۷
Al	۰٫۹۸	۰٫۹۳	۰٫۸۹	۰٫۹۵	۰٫۸۷	۰٫۸۸	۰٫۸۸	۱٫۵۵	۰٫۷۳	۰٫۸۸
Cr	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
Fe^{3+}	۱٫۰۵	۱٫۰۹	۱٫۱۴	۱٫۱۰	۱٫۱۷	۱٫۱۲	۱٫۱۳	۰٫۷۱	۱٫۲۷	۱٫۱۶
Fe^{2+}	۰٫۰۵	۰٫۰۷	۰٫۰۷	۰٫۰۵	۰٫۰۴	۰٫۰۷	۰٫۰۷	-۰٫۳۲	۰٫۰۶	۰٫۰۵
Mn	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱
Mg	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۲۰	۰٫۰۲	۰٫۰۱
Ca	۲٫۹۰	۲٫۸۹	۲٫۸۹	۲٫۹۰	۲٫۹۱	۲٫۹۰	۲٫۸۹	۲٫۹۸	۲٫۹۲	۲٫۹۱
Total	۸٫۰۰	۸٫۰۰	۸٫۰۰	۸٫۰۰	۸٫۰۰	۸٫۰۰	۸٫۰۰	۸٫۰۰	۸٫۰۰	۸٫۰۰
Almandine	۱٫۶۸	۲٫۲۴	۲٫۲۰	۱٫۵۵	۱٫۲۴	۲٫۲۰	۲٫۲۸	-۱۱٫۲۰	۱٫۸۷	۱٫۶۷
Spessartine	۰٫۵۰	۰٫۴۳	۰٫۴۳	۰٫۴۳	۰٫۳۴	۰٫۴۶	۰٫۴۱	۰٫۳۷	۰٫۳۸	۰٫۴۷
Pyrope	۰٫۵۷	۰٫۴۷	۰٫۶۹	۰٫۴۸	۰٫۷۴	۰٫۸۲	۰٫۷۷	۷٫۱۱	۰٫۵۱	۰٫۴۱
Grossular	۴۶٫۹۰	۴۴٫۶۸	۴۲٫۳۰	۴۵٫۲۵	۴۱٫۶۹	۴۲٫۵۴	۴۲٫۲۲	۷۱٫۰۴	۳۵٫۴۵	۴۱٫۹۸
Andradite	۵۰٫۳۴	۵۲٫۱۸	۵۴٫۳۸	۵۲٫۲۹	۵۵٫۹۷	۵۳٫۹۵	۵۴٫۲۹	۳۲٫۶۷	۶۱٫۷۴	۵۵٫۴۶
Uvarovite	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۰	۰٫۰۵	۰٫۰۰



شکل ۶ میانگین تغییرات درصد وزنی آندرادیت و گروسولار از توده نیمه‌عمیق به سمت سنگ آهک.



شکل ۷ الف- تصویر میکروسکوپی و ب- تصویر BSE بلورهای گارنت از سری گراندیت.



شکل ۸ الف و ب- تغییرات درصد وزنی اکسیدهای Al_2O_3، CaO، SiO_2 و FeO در مرکز و لبه بلورهای گارنت شکل ۵، پ و ت- تغییرات درصد وزنی آندرادیت در بلورهای گارنت شکل ۵ از مرکز به سمت لبه.

از آنجا که ترکیب شیمیایی گارنت در زمان‌های مختلف رشد حفظ می‌شود، بررسی پهنه‌بندی شیمیایی در گارنت از مهمترین ابزار برای تعیین تاریخچه فشار-دماست [۱۰]. هر چند منطقه‌بندی شیمیایی در سنگ‌های دگرگونی معمول نیست، اما در محیط‌هایی که سیال‌ها باعث کانی‌سازی هستند، بسیار رایج است. این گارنت‌ها دارای منطقه‌بندی بسیار ظریف و در حد میکرون هستند [۱۲،۱۱]. در این سامانه‌ها، الگوی منطقه‌بندی گارنت تغییرات به وجود آمده طی واکنش محلول-سنگ را نشان داده و اطلاعات مهمی را درباره فرایندهای گسترش سامانه‌های گرمابی به دست می‌دهد.

در ارتباط با علت پهنه‌بندی گارنت‌های گراندیتی سه فرضیه مطرح است: (۱) هر ناحیه ایجاد شده نتیجه تغییرات

[DOR: 20.1001.1.17263689.1402.31.1.6.7]
[DOI: 10.52547/ijcm.31.1.75]

مداوم یا ناگهانی در ترکیب محلول گرمابی و همچنین شرایط دما- فشار است [۱۳]. (۲) ناحیه‌بندی‌های کوچک مقیاس به دلیل نبود ثبات در پویایی رشد به وجود می‌آیند [۱۴]. (۳) پدیده ناآمیختگی باعث ایجاد شکل‌های موج مانند می‌گردد [۱۰].

افزون بر این، اسپیر [۱۵] دو فرضیه را در مورد منطقه‌بندی گارنت‌ها بیان نموده است که عبارتند از: (۱) تغییر ترکیب در لایه‌ها به دلیل تغییر شرایط بیرونی چون فشار-دما و یا تغییر در ترکیب سنگ بوجود آمده است. (۲) انتشار باعث تغییر منطقه‌بندی در گارنت‌های از پیش موجود می‌گردد به طوری که ساختار منطقه‌ای در اثر انتشار، در بلورهای همگن و یا ناهمگن از پیش موجود ایجاد می‌شود و با رشد همراه نیست. پدیده انتشار در اثر انتقال مواد از محلی به محل دیگر رخ می‌دهد و عامل اصلی آن شیب پتانسیل شیمیایی ترکیبی و یا گرمایی است. منطقه‌بندی انتشاری با بازتوزیع اتم‌ها در ساختار بلوری و تغییر در فراوانی نسبی اتم‌ها همراه است. این نوع منطقه‌بندی بیشتر در دگرگونی‌های با درجه بالا دیده می‌شود. به طور کلی می‌توان گفت که ایجاد ناحیه‌بندی نوسانی گارنت می‌تواند به دو عامل ذیل مربوط باشد: (۱) علت‌های داخلی که به وضعیت درونی بلور مربوط هستند [۱۶-۱۹] و باعث تغییرات قابل توجهی در ترکیب گارنت نمی‌شوند و (۲) علت-های بیرونی که شامل تغییرات دما، گریزندگی اکسیژن، pH و شوری هستند [۲۰-۲۲].

بر خلاف سامانه‌های بسته که منطقه‌بندی به صورت غنی‌شدگی یک یا چند عنصر ویژه در مرکز و کاهش تدریجی آن‌ها به سمت لبه بلور است، در سامانه‌های باز تغییر عناصر به صورت منظم و خطی نیست [۲۳].

بطور کلی سازوکار تشکیل گارنت در محیط‌های اسکارنی چنین است که نفوذ و سرد شدن ماگمای غنی از H_2O در سطوح پوسته‌ای کم عمق منجر به رهایی مقدار زیادی محلول به درون سنگ‌های میزبان می‌شود. طی دگرگونی مجاورتی و دگرسانی گرمابی سنگ‌های دارای کربنات، گارنت‌های کلسیم-دار در شرایط مختلف فیزیکوشیمیایی رشد می‌کنند. تغییر در شرایط فیزیکی و ترکیب شیمیایی محلول و جنس سنگ مادر، نوع کانی‌های تشکیل شده را کنترل می‌نماید. برای مثال، تغییر در دما، XCO_2 و فعالیت Fe^{3+} بر پایداری آندرادیت اثر می-گذارد [۲۵،۲۴].

بررسی منطقه‌بندی در گارنت‌های بیشه نشان می‌دهد که گارنت در زمان نفوذ هورنبلند دیوریت پورفیری در سنگ آهک تشکیل شده است. طی رخدادهای دگرنهادی در منطقه، Si، Fe و Al محلول با Ca کربنات وارد واکنش شده و گارنت گراندیت تشکیل شده است. مقدار عناصر گارنت‌های مورد بررسی، تغییرات ناگهانی و نوسانی نشان می‌دهند. تکرار تغییرات مشخص گویای آن است که این وضعیت در اثر پدیده نشر تشکیل نشده اما طی رشد، امکان ایجاد چنین نوسان‌هایی فراهم است. ناحیه‌بندی شیمیایی بیشتر مربوط به نسبت Fe^{3+}/Al است ولی پراکندگی عناصر کمیاب و فرعی چون Ti، Mn و As نیز وجود دارد. منطقه‌بندی نوسانی به احتمال بسیار نشانگر تغییر در ترکیب محلول بوده که وابسته به کنترل کننده‌های داخلی و خارجی است.

عوامل خارجی (چون نشت) و داخلی (مانند تجزیه کانی‌های موجود در سنگ) ترکیب محلول را کنترل می‌کنند. در مناطقی که عضو انتهایی گروسولار افزایش نشان می‌دهد، کنترل‌کننده‌های داخلی و در مناطقی که عضو انتهایی آندرادیت افزایش دارد، کنترل کننده‌های خارجی نقش بیشتری دارند [۲۳].

در حالتی که حرکت محلول و رشد بلور آهسته باشد، لایه‌های غنی از گروسولار ایجاد می‌گردد و در مقابل، رشد سریع بلور باعث تشکیل آندرادیت می‌شود و نشانگر نفوذ محلول‌های خارجی است [۲۶].

افزایش XCO_2، گریزندگی اکسیژن، (fO_2) و محلول‌های با شوری بالا شرایط را برای افزایش عضو انتهایی آندرادیت در سری محلول جامد گراندیت مهیا می‌کند [۲۷]. افزون بر این، تغییر در مقدار آهن مناطق مختلف گارنت با تغییر شوری محلول‌ها نیز در ارتباط است [۲۸].

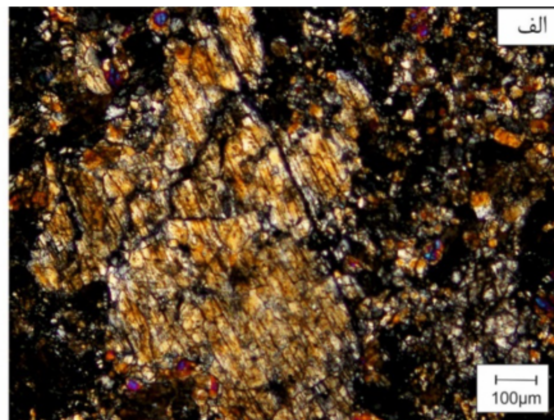
به باور برخی پژوهشگران [۲۶]، جوشش از مهمترین عوامل ایجاد ناحیه‌بندی شیمیایی است. جوشش باعث اکسایش محلول و افزایش aFe^{3+}/aAl^{3+} و در نتیجه افزایش آندرادیت در سری محلول جامد گراندیت می‌شود. در فاصله زمانی بین این دوره‌ها، عضو انتهایی گروسولار به دلیل کاهش گریزندگی اکسیژن، افزایش می‌یابد.

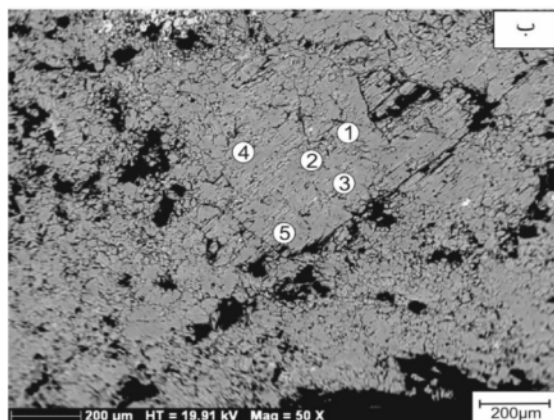
پیروکسن

پیروکسن‌های مورد بررسی (۱۲۴ نقطه تجزیه شده) به صورت محلول‌های جامد دیوپسید ($CaMgSi_2O_6$, Di) و هدنبرژیت

[DOI: 10.52547/ijcm.31.1.75]

با مقادیر بسیار کم ژوهانسنیت ($CaFeSi_2O_6$, Hd) ($CaMnSi_2O_6$, Jh) هستند (جدول ۳). این کانی‌ها از نظر نوری بدون منطقه‌بندی و همگن هستند (شکل ۹). چنان که در جدول ۳ دیده می‌شود، پیروکسن‌های مورد بررسی، به عضو انتهایی دیوپسید نزدیک هستند به‌طوری‌که بیشترین مقدار دیوپسید ۹۶٫۰۸ و کمترین مقدار آن ۶۴٫۹۷ درصد است. تغییر ترکیب پیروکسن‌های نقاط مختلف در منطقه مورد بررسی، ناشی از ترکیب شیمیایی سنگ اولیه، تغییرات فشار (P)، دما (T)، ترکیب سیال f(X)، گریزندگی اکسیژن (fO_2)، pH و غیره است. گریزندگی اکسیژن بیشترین اثر را بر ترکیب شیمیایی پیروکسن دارد [۲۹].





شکل ۹ الف- تصویر میکروسکوپی و ب- تصویر الکترونی پس پراکنده (BSE) از نمونه پیروکسن تجزیه شده (نمونه N.B.C.169-C4)

جدول۳ نتایج تجزیه ریزپردازشی پیروکسن‌ها و محاسبه اعضای پایانی آن‌ها بر پایه ۶ اکسیژن

	57-C1-Px1	57-C1-Px2	57-C1-Px3	57-C1-Px4	57-C1-Px5	57-C1-Px6	57-C2-Cpx-1	57-C2-Cpx-2	57-C2-Cpx-3	57-C2-Cpx-4
SiO_2	۵۲٫۳۹	۵۳٫۰۷	۵۳٫۰۱	۵۱٫۰۹	۵۴٫۱۷	۵۰٫۶۰	۵۰٫۱۰	۵۰٫۳۰	۵۴٫۲۶	۵۳٫۶۰
TiO_2	۰٫۳۴	۰٫۱۸	۰٫۳۲	۰٫۶۳	۰٫۱۲	۰٫۳۲	۰٫۴۴	۰٫۵۵	۰٫۰۴	۰٫۰۴
Al_2O_3	۲٫۶۵	۱٫۷۵	۲٫۳۷	۴٫۲۵	۱٫۰۰	۳٫۸۹	۴٫۶۵	۴٫۷۰	۰٫۴۸	۰٫۵۳
Cr_2O_3	۰٫۰۴	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۰	۰٫۰۲	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۷	۰٫۰۰	۰٫۰۳
FeO	۲٫۸۰	۲٫۹۱	۱٫۲۳	۱٫۷۸	۳٫۴۹	۴٫۴۲	۴٫۶۵	۳٫۴۸	۴٫۵۱	۶٫۵۰
MnO	۰٫۱۵	۰٫۱۶	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۱۷	۰٫۱۵	۰٫۱۳	۰٫۱۲	۰٫۲۱	۰٫۲۲
MgO	۱۶٫۳۹	۱۶٫۷۶	۱۷٫۳۱	۱۶٫۳۶	۱۶٫۷۱	۱۵٫۱۶	۱۴٫۹۸	۱۵٫۳۸	۱۶٫۰۱	۱۴٫۸۲
CaO	۲۵٫۳۰	۲۵٫۲۶	۲۵٫۳۰	۲۵٫۲۹	۲۴٫۸۱	۲۵٫۱۷	۲۵٫۱۷	۲۵٫۱۷	۲۵٫۱۲	۲۴٫۹۱
Na2O	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۲	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۳	۰٫۰۰	۰٫۰۰
K2O	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۲	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰
مجموع	۱۰۰٫۰۶	۱۰۰٫۱۳	۹۹٫۵۸	۹۹٫۴۳	۱۰۰٫۵۴	۹۹٫۷۵	۱۰۰٫۱۵	۹۹٫۸۱	۱۰۰٫۶۳	۱۰۰٫۶۷
فرمول(corr.)	۶(O)	۶(O)	۶(O)	۶(O)	۶(O)	۶(O)	۶(O)	۶(O)	۶(O)	۶(O)
Si	۱٫۹۱	۱٫۹۳	۱٫۹۳	۱٫۸۷	۱٫۹۷	۱٫۸۶	۱٫۸۳	۱٫۸۴	۱٫۹۸	۱٫۹۷
Ti	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۰	۰٫۰۰
Al	۰٫۱۱	۰٫۰۸	۰٫۱۰	۰٫۱۸	۰٫۰۴	۰٫۱۷	۰٫۲۰	۰٫۲۰	۰٫۰۲	۰٫۰۲
Cr	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
Fe^{3+}	۰٫۰۵	۰٫۰۵	۰٫۰۳	۰٫۰۵	۰٫۰۲	۰٫۰۹	۰٫۱۱	۰٫۰۸	۰٫۰۲	۰٫۰۳
Fe^{2+}	۰٫۰۳	۰٫۰۴	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۹	۰٫۰۴	۰٫۰۴	۰٫۰۲	۰٫۱۲	۰٫۱۷
Mn	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۱
Mg	۰٫۸۹	۰٫۹۱	۰٫۹۴	۰٫۸۹	۰٫۹۱	۰٫۸۳	۰٫۸۲	۰٫۸۴	۰٫۸۷	۰٫۸۱
Ca	۰٫۹۹	۰٫۹۸	۰٫۹۹	۰٫۹۹	۰٫۹۷	۰٫۹۹	۰٫۹۹	۰٫۹۹	۰٫۹۸	۰٫۹۸
Na	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
K	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
مجموع	۴٫۰۰	۴٫۰۰	۴٫۰۰	۴٫۰۰	۴٫۰۰	۴٫۰۰	۴٫۰۰	۴٫۰۰	۴٫۰۰	۴٫۰۰
هدنبرژیت	۸٫۷۱	۸٫۸۲	۳٫۸۳	۵٫۷۵	۱۰٫۴۴	۱۳٫۹۹	۱۴٫۷۷	۱۱٫۲۳	۱۳٫۵۷	۱۹٫۶۲
دیوپسید	۹۰٫۸۳	۹۰٫۶۸	۹۶٫۰۸	۹۴٫۱۷	۸۹٫۰۵	۸۵٫۵۳	۸۴٫۸۳	۸۸٫۳۹	۸۵٫۷۸	۷۹٫۷۱
ژوهانسنیت	۰٫۴۶	۰٫۵۰	۰٫۱۰	۰٫۰۸	۰٫۵۱	۰٫۴۸	۰٫۴۱	۰٫۳۸	۰٫۶۵	۰٫۶۷

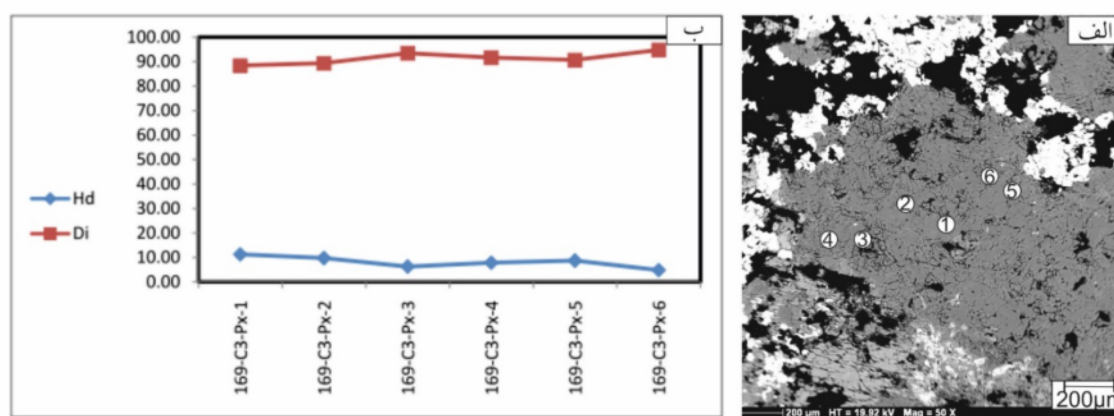
[DOR: 20.1001.1.17263689.1402.31.1.6.7]
[DOI: 10.52547/ijcm.31.1.75]

پیروکسن‌های بررسی شده، همگن هستند و از نظر نوری منطقه‌بندی ویژه‌ای در آن‌ها دیده نمی‌شود. این امر در نتایج تجزیه این کانی نیز مشخص است. شکل ۱۰ الف تصویر BSE یک بلور پیروکسن و جایگاه نقاط تجزیه شده و شکل ۱۰ ب تغییرات مقدار دیوپسید و هدنبرژیت را در نقاط مختلف آن نشان می‌دهد.

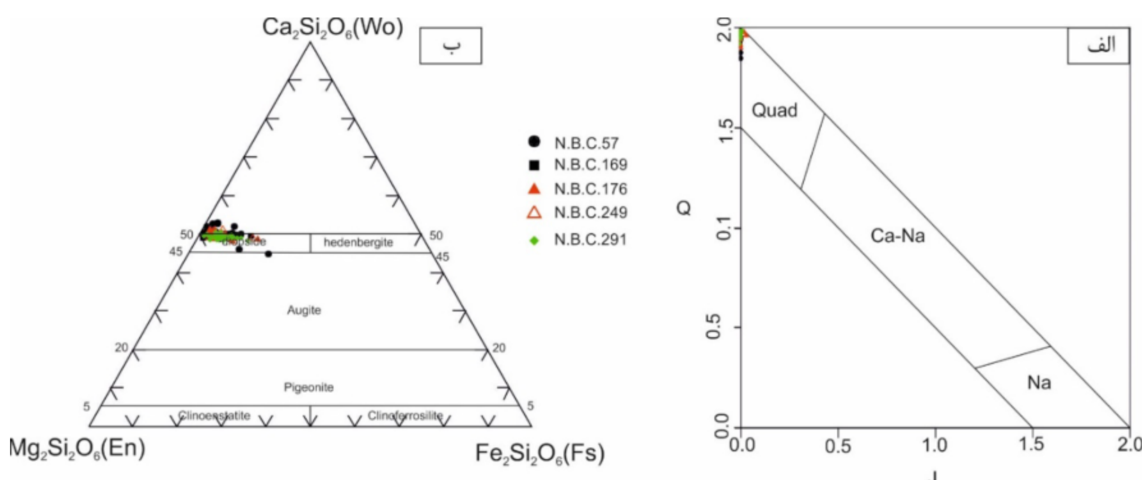
مقدار Mn/Fe پیروکسن‌ها از عوامل در ارتباط با نوع کانی‌سازی است، به طوری‌که این نسبت در کانسارهای مس-آهن اسکارنی، کمتر از ۰/۱، در کانسارهای سرب و روی اسکارنی بیشتر از ۰/۲ و در کانسارهای تنگستن حدود ۰/۱۵ است [۳۰]. براین اساس، پیروکسن‌های منطقه مورد بررسی با کانسارهای آهن و مس همخوانی دارند (جدول ۳).

بر اساس نمودار Q-J [۳۱] (شکل ۱۱ الف)، همه پیروکسن‌ها در گستره پیروکسن‌های کلسیم-منیزیم- آهن دار (Quad) و بر پایه نمودار سه‌تایی فروسیلیت- انستاتیت- ولاستونیت [۳۱] (شکل ۱۱ ب)، در گستره دیوپسید قرار دارند.

شکل ۱۲ الف موقعیت گارنت‌های تجزیه شده را در نمودار مثلثی گارنت‌ها و شکل ۱۲ ب نیز موقعیت نمونه‌های پیروکسن تجزیه شده را در نمودار مثلثی هدنبرگیت-دیوپسید-ژوهانسنیت و همخوانی کامل آن‌ها با گارنت‌ها و پیروکسن‌های همراه با اسکارن‌های آهن را نشان می‌دهد [۳۲].

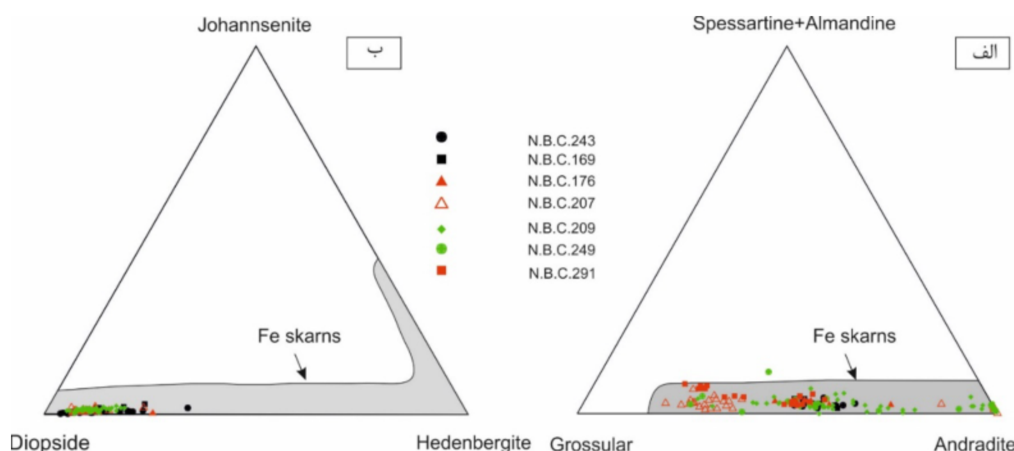


شکل ۱۰ الف تصویر الکترونی پس پراکنده (BSE) از نمونه پیروکسن و ب- تغییرات درصد وزنی دیوپسید و هدنبرژیت در مرکز و لبه بلورهای پیروکسن.



شکل ۱۱ الف- نمودار Q-J [۳۱] بر پایه داده‌های پیروکسن‌های بیشه $Q=Ca^{+} Mg + Fe2^{+}$ و $J =2Na$ ب- موقعیت پیروکسن‌های منطقه بیشه در نمودار سه تایی فروسیلیت- انستاتیت- ولاستونیت [۳۱].

[DOR: 20.1001.1.17263689.1402.31.1.6.7]
[DOI: 10.52547/ijcm.31.1.75]



شکل ۱۲ الف- ترکیب گارنت‌های مورد بررسی در نمودار سه‌تایی گارنت‌ها و مقایسه آن‌ها با گارنت‌های همراه با اسکارن‌های آهن و ب- ترکیب پیروکسن‌های مورد بررسی در نمودار سه‌تایی هدنبرژیت-دیوپسید-ژوهانسنیت و مقایسه آن‌ها با پیروکسن‌های همراه با اسکارن‌های آهن [۳۲] .

محاسبه گریزندگی اکسیژن براساس ترکیب گارنت و پیروکسن

X_{Ad} در گارنت و X_{Hd} در پیروکسن و کانی‌های همراه با آن‌ها چون ولاستونیت، کوارتز، مگنتیت و کلسیت می‌تواند در برآورد شرایط فیزیکوشیمیایی و به ویژه تعیین گریزندگی اکسیژن طی تشکیل اسکارن مؤثر باشند. به بیان دیگر، تغییر گریزندگی اکسیژن در کنترل ترکیب گارنت و پیروکسن‌های همیافت بسیار مهم است. رابطه زیر برای محاسبه گریزندگی اکسیژن در مجموعه‌های اسکارنی به کار می‌رود [۲۴]:

$$\log fO_2: =E+A+B/T+D(P-1)/T+C\log fCO_2 \quad (۱)$$

که پارامترهای این رابطه برای مجموعه آندرادیت، هدنبرژیت، مگنتیت و کوارتز که نزدیک‌ترین مجموعه کانیایی به اسکارن مورد بررسی است عبارتند از:

$$E= 12.51;\ D=0.078; A=3\log X_{Ad}- 4.5\log X_{Hd};\ C=0;$$

$$B=-27{,}576-1{,}007(1-X_{Ad})^2-1{,}476(1-X_{Hd})^2 \quad (۲)$$

چنان که از رابطه (۲) برمی‌آید، X_{Ad} و X_{Hd} از پارامترهای مؤثر در برآورد شرایط اکسایش اسکارن هستند. با استفاده از نرم افزار Fugacity که بر پایه رابطه (۱) استوار است، شرایط اکسایش اسکارن بیشه ارزیابی شد. نتایج محاسبات که در آن فشار ۵۰۰ بار، دما ۴۳۰ درجه سانتی‌گراد و XCO_2 برابر با ۰/۱ بار فرض شد، در جدول ۴ آمده است.

پاراژنز کانی‌ها و بررسی شرایط فیزیکوشیمیایی تشکیل اسکارن بیشه

دو مرحله کلی کانی‌زایی در بیشه تشخیص داده شد: ۱) مرحله پیشرونده و ۲) مرحله پسرونده. در مرحله پیشرونده، کانی‌های سیلیکات کلسیم بدون آب (گارنت، پیروکسن) تشکیل شده و در مرحله پسرونده کانی‌های سیلیکات کلسیم آبدار (اپیدوت، ترمولیت-اکتینولیت)، سیلیس(کوارتز)، کربنات (کلسیت) و کانی‌های کدر (مگنتیت، پیریت، پیروتیت) جانشین شده‌اند.

شکل ۱۳ توالی پاراژنزی کانی‌های اسکارن مورد بررسی را نشان می‌دهد که با سایر اسکارنهای آهن گزارش شده توسط سایر پژوهشگران [۳۳-۳۵] قابل مقایسه است.

برای تعیین شرایط احتمالی P-T-X می‌توان سامانه Ca-Fe-Si-C-O-H را در نظر گرفت [۳۶]، زیرا کانی‌های مورد بررسی در این سامانه جای می‌گیرند. این نمودار بر پایه فشار ۰/۵ کیلوبار و XCO_2=۰/۱ طراحی شده است (شکل ۱۴).

آندرادیت گستره پایداری وسیعی از ۴۰۰ تا ۷۰۰ درجه سانتیگراد و 10^{-25} تا $fO_2= 10^{-15}$ را نشان می‌دهد. با توجه به تشکیل نشدن ولاستونیت در اسکارن بیشه، می‌توان دمای کمتر از ۵۵۰ درجه سانتیگراد را برای تشکیل آن در نظر گرفت. در دمای کمتر از ۴۳۰°C، آندرادیت در 10^{-24} تا $fO_2= 10^{-21}$ به مجموعه کانیایی کوارتز، کلسیت و مگنتیت و در دمای کمتر از ۴۰۰°C و $fO_2> 10^{-21}$ به مجموعه کوارتز-کلسیت-هماتیت تبدیل می‌شود.

آندرادیت در دمای بیش از ۴۳۰°C، حتی در سولفیدشدگی بالا، پایدار است، اما در دمای کمتر از آن و افزایش گریزندگی گوگرد، به کوارتز، کلسیت و پیروتیت و با افزایش بیشتر گریزندگی گوگرد به کوارتز، کلسیت و پیریت تبدیل می‌شود. برای $fS_2<10^{-6}$ و در دماهای کمتر یا مساوی ۴۳۰° C، مجموعه‌های کانیایی مگنتیت-کلسیت-کوارتز برآمده از دگرسانی آندرادیت می‌توانند پایدار باشند (شکل ۱۵).

[DOR: 20.1001.1.17263689.1402.31.1.6.7]
[DOI: 10.52547/ijcm.31.1.75]

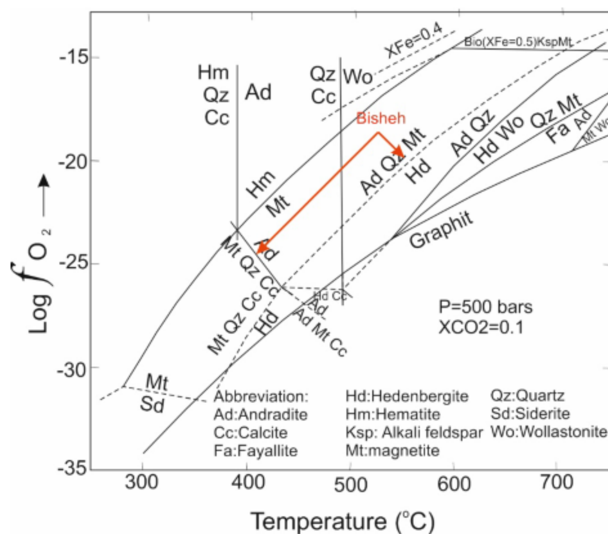
با توجه به حضور کلسیت، کوارتز، مگنتیت، پیریت و پیروتیت در منطقه مورد بررسی، به نظر می‌رسد که محلول‌های دگرنهاد کننده در مرحله پسرونده، دمای کمتر از ۴۳۰ درجه سانتیگراد و حدود fS_2 10^{-7} داشته‌اند.

جدول ۴ نتایج حاصل از محاسبه گریزندگی اکسیژن در نمونه‌های برداشت شده از چاه‌های شماره ۲ و ۵

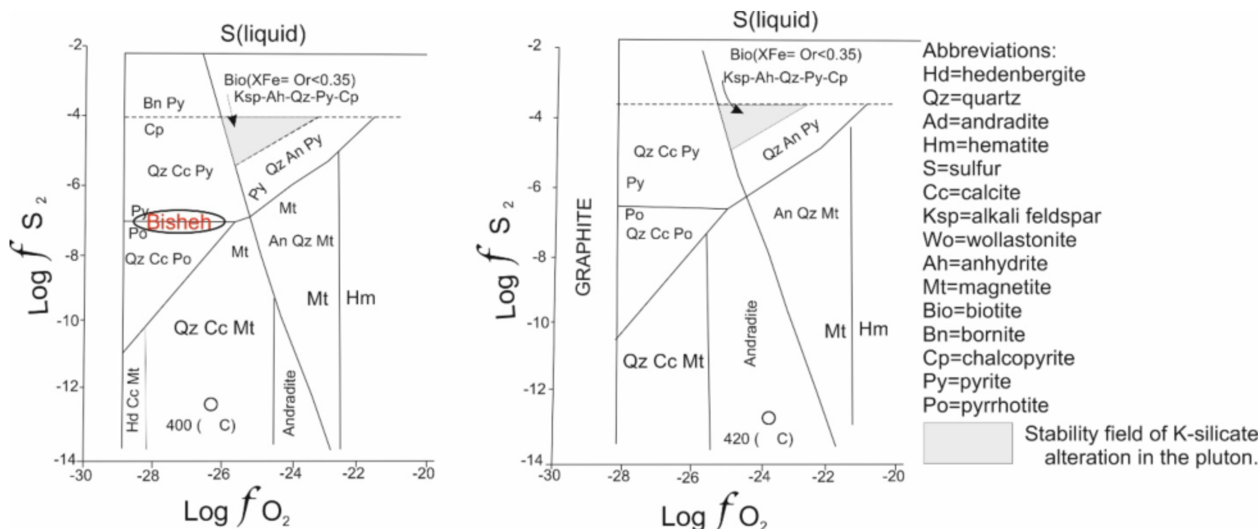
متوسط لگاریتم گریزندگی اکسیژن(MPa)	لگاریتم گریزندگی اکسیژن(MPa)	متوسط X_{Hd}	متوسط X_{Ad}	چاه برداشتی	شماره نمونه
-۱۹/۶۱	-۱۹/۱۵	۰/۰۸	۰/۵۵	چاه شماره ۲	N.B.C.169
	-۲۰/۰۸	۰/۱	۰/۵۵		N.B.C.176
-۲۰/۷۵	-۲۱/۶۵	۰/۱۱	۰/۴۰	چاه شماره ۵	N.B.C.291
	-۱۹/۵	۰/۱	۰/۶۳		N.B.C.249

Minerals	Prograde stage	Retrograde stage Stage I	Retrograde stage Stage II	Supergene
Garnet				
Pyroxene				
Scapollite				
Vesuvianite				
Amphibole				
Biotite				
Epidote				
Chlorite				
Quartz				
Calcite				
Magnetite				
Pyrite				
Chalcopyrite				
Pyrrhotite				
Hematite				
Goethite				
Malachite				

شکل ۱۳ توالی همبرزایی کانی‌های اسکارن بیشه.



شکل ۱۴ نمودار روابط فازی LOGfO2-T در XCO2=0.1 و فشار ۵۰۰ بار برای سامانه Ca-Fe-Si-C-O-H، [۳۶].



شکل ۱۵ نمودار گریزندگی $\log fS_2$ *نسبت به* $\log fO_2$ برای تعیین گستره پایداری آندرادیت در دمای ۴۰۰ و ۴۲۰ درجه سانتیگراد و $XCO_2= 0.1$ [۳۶].

برداشت

گارنت آندرادیت- گروسولار (گراندیت) و پیروکسن در اثر محلول‌های گرمابی در ارتباط با دگرگونی مجاورتی در مرحله پیشرونده اسکارن بیشه تشکیل شده‌اند. در این راستا، گسل‌های منطقه نقش مهمی را به‌عنوان گذرگاه‌هایی برای عبور و انتشار سیال‌ها و ایجاد کانه‌زایی داشته‌اند. گارنت‌ها بر پایه ویژگی‌های نوری و شیمی عناصر اصلی، منطقه‌بندی شیمیایی نوسانی نشان می‌دهند. پیروکسن به صورت محلول جامد دیوپسید- هدنبرژیت با مقادیر بسیار کم ژوهانسنیت است. این کانی همگن بوده و از نظر نوری و شیمیایی منطقه‌بندی ویژه‌ای در آن دیده نمی‌شود. نمونه‌های مورد بررسی با گارنت‌ها و پیروکسن‌های همراه با کانی‌سازی آهن اسکارنی همخوانی کامل دارند. پهنه گارنت در کنار توده نفوذی تشکیل شده است. مگنتیت از تبدیل گارنت در مرحله پسرونده اسکارن به وجود آمده است. با توجه به تشکیل نشدن ولاستونیت در اسکارن بیشه، دمای تشکیل آن کمتر از ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد بوده و مرحله پسرونده در دمای ۴۷۰ درجه سانتی‌گراد شروع شده و تا پایین‌تر از ۴۳۰ درجه سانتیگراد ادامه داشته است. در این مرحله، گارنت به اپیدوت، کوارتز، مگنتیت، پیریت، پیروتیت و کانی‌های کربناتی تبدیل شده است. مقدار گریزندگی گوگرد برای محلول‌های دگرنهاد کننده حدود 10^{-7} تعیین گردید.

قدردانی

نگارندگان از زحمات پروفسور Morgan در دانشگاه اوکلاهمای آمریکا و همچنین از داوران محترم مجله تشکر و قدردانی می‌نمایند.

مراجع

[1] Burt D.M., *"Skarn deposits—historical bibliography through 1970"*, Economic Geology 77 (1982) 755–763.

[2] Behrouzi A., Nazer N. Kh., *"Geological Map of Basiran, 1:100000"*, Geological Survey and Mineral Exploration of Iran, Tehran (1992).

[3] Berberian M., King G.C.P., *"Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran"*, Canadian Journal of Earth Sciences 18 (1981) 210–265.

[4] Massawe R. J., Lentz D. R., *"Skarn formation and Cu-Ag mineralization in the McKenzie Gulch area, northern New Brunswick, Canada: Implication for the applications of mineral chemistry in exploration for porphyry copper and skarn deposits"*, Journal of Geochemical Exploration (2022) 106965.

[5] Xie S., Yang L., He W., Gao X., *"Garnet trace element geochemistry of Yangla Cu deposit in NW Yunnan, China: Implications for multistage ore-fluid activities in skarn system"*, *Ore Geology Reviews* (2021) 104662.

[6] Whitney D., Evans B., *"Abbreviations for names of rock-forming minerals"*, American Mineralogist 95(1) (2010) 185–187.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1402.31.1.6.7]
[DOI: 10.52547/ijcm.31.1.75]

crystals", American Mineralogist 82(5-6) (1997) 596-606.

[18] Ortoleva P. J., *"Geochemical Self-Organization",* Oxford University Press (1994) New York.

[19] Jamtveit B., Ragnarsdottir K. V., Wood B. J., *"On the origin of zoned grossular-andradite garnets in hydrothermal systems",* European Journal of Mineralogy (1995) 7(6).

[20] Ginibre C., Kronz A., WoÈrner G., *"High-resolution quantitative imaging of plagioclase composition using accumulated backscattered electron images: new constraints on oscillatory zoning",* Contributions to Mineralogy and Petrology 142(4) (2002) 436-448.

[21] Ciobanu C. L., Cook N. J., *"Skarn textures and a case study: The Ocna de Fier-Dognecea orefield, Banat, Romania",* Ore Geology Reviews 24(3-4) (2004) 315-370.

[22] Streck M. J., *"Mineral textures and zoning as evidence for open system processes",* Reviews in Mineralogy and Geochemistry 69(1) (2008) 595-622.

[23] Masoudi F., Mehrabi B., Farazdel F., *"Type of garnet zoning in skarns of Ghohroud intrusion, south of Kashan",* Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 13(1) (2005) 43-61.

[24] Zhang Z., Saxena S. K., *"Thermodynamic properties of andradite and application to skarn with coexisting andradite and hedenbergite",* Contributions to Mineralogy and Petrology 107(2) (1991) 255-263.

[25] Taylor B. E., Liou J. G., *"The low-temperature stability of andradite in COH fluids",* American Mineralogist 63(3-4) (1978) 378-393.

[26] Jamtveit B., Hervig R. L., *"Constraints on transport and kinetics in hydrothermal systems from zoned garnet crystals",* Science 263(5146) (1994) 505-508.

[27] Deer W.A., Howie R.A., Zussman J., *"An introduction to the rock- forming minerals",* second ed. Longman Scientific and Technical, London (1992) 696p.

[28] Kwak T. A. P., Brown W. M., Abeysinghe P. B., Tan T. H., *"Fe solubilities in very saline hydrothermal fluids: Their relation to zoning in some ore deposits",* Economic Geology 81(2) (1986) 447-465.

[29] Bowman J.R., Essene E.J., *"Contact skarn formation at Elkhorn, Montana: I, P-T component*

[7] Nakhaei M., *"Skarn mineralogy, geochemical exploration, magnetometry, dating, Sm-Nd and Rb-Sr isotopic studies of intrusive bodies in Bisheh iron mineralization area, Birjand"*, Ph.D. thesis, Ferdowsi University of Mashhad (2014) 388p.

[8] Collins L. G., *"Hydrothermal differentiation",* Theophrastus Publication, Athens (1988).

[9] Baxter E. F., Caddick M. J., Ague J. J., *"Garnet: Common mineral, uncommonly useful"*, Elements 9(6) (2013) 415-419.

[10] Ranjbar S., Tabatabaei Manesh S. M., Mackizadeh M. A., Tabatabaei S. H., Parfenova O. V., *"Geochemistry of major and rare earth elements in garnet of the Kal-e Kafi skarn, Anarak Area, Central Iran: Constraints on processes in a hydrothermal system",* Geochemistry International 54(5) (2016) 423-438.

[11] Gaspar M., Knaack C., Meinert L. D., Moretti R., *"REE in skarn systems: A LA-ICP-MS study of garnets from the Crown Jewel gold deposit"*, Geochimica et cosmochimica acta, 72(1) (2008)185-205.

[12] Smith M. P., Henderson P., Jeffries T. E. R., Long J., Williams C. T., *"The rare earth elements and uranium in garnets from the Beinn an Dubhaich Aureole, Skye, Scotland, UK: Constraints on processes in a dynamic hydrothermal system",* Journal of Petrology, 45(3) (2004) 457-484.

[13] García-Casco A., Torres-Roldán R. L., Millán G., Monié P., Schneider J., *"Oscillatory zoning in eclogitic garnet and amphibole, Northern Serpentinite Melange, Cuba: A record of tectonic instability during subduction?",* Journal of Metamorphic Geology 20(6) (2002) 581-598.

[14] Jamtveit B., Andersen T. B., "Morphological instabilities during rapid growth of metamorphic garnets", Physics and Chemistry of Minerals 19(3) (1992) 176-184.

[15] Spear F. S., *"Metamorphic phase equilibria and pressure-temperature-time paths",* Mineralogical Society of America Monograph (1993) 352-356.

[16] Fei X., Zhang Z., Cheng Z., Santosh M., *"Factors controlling the crystal morphology and chemistry of garnet in skarn deposits: A case study from the Cuihongshan polymetallic deposit, Lesser Xing'an Range, NE China"*, *American Mineralogist: Journal of Earth and Planetary Materials 104*(10) (2019) 1455-1468.

[17] Holten T., Jamtveit B., Meakin P., Cortini M., Blundy J., Austrheim H., *"Statistical characteristics and origin of oscillatory zoning in*

bodies and investigation of genesis of related skarn using mineral chemistry data in Tighanab area, southeast of Sarbisheh (east of Iran)", Iranian Journal of Petrology 11(2021) 1-28.

[35] Akbarpour A., Khalatbari Jafari M., *"Petrography and geochemistry of Ebrahim-Abad iron ore deposit (northwest Divandere, Kurdistan Province)",* Iranian Journal of Petrology 11(2021) 57-74.

[36] Einaudi M. T., *"General features and origin of skarns associated with porphyry copper plutons, southwestern North America",* In: Titley S. R. (Ed.), Advances in geology of the porphyry copper deposits, southwestern North America, University of Arizona press (1982) 185-210.

activity conditions of early skarn formation", American Journal of science 284(1984)597-650.

[30] Nakano T., Yoshino T., Shimazaki H., Shimizu M., *"Pyroxene composition as an indicator in the classification of skarn deposits",* Economic Geology 89(7) (1994) 1567-1580.

[31] Morimoto N., *"Nomenclature of pyroxenes",* American Mineralogist 73(1988) 1123-1133

[32] Meinert L.D., *"Skarns and skarn deposits",* Geoscience Canada 19 (1992)145–162.

[33] Sherafat S., Mackizadeh M. A., *"Mineralogy and Genesis of Joveinan Iron Skarn (Cenozoic Magmatic Arc, North of Isfahan)",* Iranian Journal of Petrology 8(2017) 89-108.

[34] Mohammadi S. S., Chung S. L., Nakhaei M., *"Thermobarometry of quartz diorite porphyry*

[DOR: 20.1001.1.17263689.1402.31.1.6.7]

[DOI: 10.52547/ijcm.31.1.75]